

視覚探索に関する事象関連電位研究の展望

宮谷 真人
(1994年9月9日受理)

Review of event-related potential studies on visual search

Makoto Miyatani

The visual search has been one of the most prevailing paradigms in the modern attention research. In this article, I tried to review behavioral and event-related potential (ERP) studies on visual search. It has been proved that the ERP indices such as P3b, search-related negativity, NA, and so on could reflect various aspects of human information processing, which would not be achieved only by behavioral reaction time measure. The advantages and the direction of future ERP studies on visual search were discussed.

Key words: event-related potentials (ERPs), visual search, memory search, attention

1. 注意と視覚探索課題

人間を含む全ての生体にとって、環境内の雑多な情報の中から、自分が必要とし、あるいは自分にとって危険な対象をすばやく正確に見つけることは、環境へ適応するために不可欠な働きである。このような環境と生体との選択的作用は、“注意”という用語で表現される。従来、人間の活動のさまざまな側面を表現するために注意という用語が使われてきており(例えば、Moray, 1969の分類を参照)、その意味するところは必ずしも同じではないが、何らかの選択性を意味する用語であることについては一貫している(Johnston & Dark, 1986)。

注意に関する研究でよく用いられてきた課題の1つに、視覚探索課題がある。この課題では、あらかじめ被験者に、検出すべき項目(標的)を1つ以上覚えてもらう。被験者は、その後呈示される刺激について、標的の有無やその位置に関する判断を求められる。検出すべき標的の集合を記憶セットと呼び、それに含まれる標的の数を記憶セットの大きさという。被験者に何らかの判断を求めるために呈示される刺激がテスト刺激(または刺激セット)である。テスト刺激には、

標的や標的以外の項目(妨害項目)が1つ以上含まれる。テスト刺激を構成する項目の数を、刺激セットの大きさという。テスト刺激に標的が含まれている場合、そのテスト刺激を標的の刺激と呼び、妨害項目だけで構成されるテスト刺激のことを非標的の刺激と呼ぶ。標的の刺激が呈示される試行のことを正(positive)試行、非標的の刺激が呈示される試行のことを負(negative)試行と呼ぶ。

視覚探索課題について、どのような実験的操作を加えるかによって記憶探索課題と視空間的探索課題を区別することができる。刺激セットの大きさを1とし、記憶セットの大きさを変化させる場合が記憶探索課題であり、記憶セットを1として刺激セットの大きさを変化させる場合が視空間的探索課題である。前者の操作によって影響される処理過程(記憶探索過程)と後者が影響する処理過程(視空間的探索過程)とでは、その性質やメカニズムが異なると考えられている(Fisk & Rogers, 1991; Flach, 1986)。なお、visual searchという用語は、視覚刺激を用いた(記憶探索過程も含めた)探索という意味でも、刺激セットの大きさを変化させる課題という意味でも用いられる。本稿では2つの用法を区別するために、前者を視覚探索、

後者を視空間的探索と呼んで区別する。

記憶セットや刺激セットの大きさによって決まる課題の困難度は、負荷という用語で表現される。記憶セットの大きさによって定まる記憶負荷と刺激セットの大きさによって決まる空間負荷がある。空間負荷は、刺激セットの大きさだけでなく、例えば標的と妨害項目との類似性や妨害項目同士の類似性によっても操作することができる。実際の課題では、記憶負荷と空間負荷の両方が操作されることも多く、記憶負荷と記憶負荷の組み合わせによって課題の負荷が定まる。視覚探索課題における記憶負荷や空間負荷の変化が標的検出に要する反応時間や正解率に及ぼす影響に基づいて、制御的探索と自動的検出の区別 (Schneider & Shiffrin, 1977; Shiffrin & Schneider, 1977) や視覚情報処理における並列的・前注意的過程と系列的・注意的過程の区別 (Hoffman, 1979; Neisser, 1967; Treisman & Gelade, 1980) などが行われてきた。

視覚探索課題は、記憶セットの選定方法により、変動マッピング (varied mapping, VM) 課題と固定マッピング (consistent mapping, CM) 課題に分けて考えることができる。VM課題では、ある試行で標的となった項目が別の試行では妨害項目として用いられる。一方、CM課題では、標的として用いられる項目が妨害項目となることはない。

2. 行動測度による視覚探索研究

記憶探索過程を調べるための基本的な手続きは、Sternberg (1966) が用いた方法である。彼は、刺激項目として数字を用い、記憶セットの大きさを1から6まで変化させ、それに伴う標的検出時間の変化を調べた。その結果、記憶セットの大きさとともに標的検出時間は直線的に増大した。負試行における反応時間が正試行の反応時間に比べてやや長かったが、記憶セットによる反応時間の延長の割合には、正、負試行に差が認められなかった。彼は、この結果から、短期記憶における記憶項目の検索過程について、直列悉皆型の探索が行われると結論した。しかし、Sternberg (1966) 以降、直列悉皆モデル以外にも彼の実験結果を説明できるモデルが提唱されたり (Theios, Smith, Haviland, Trauman, & Moy, 1973; Townsend, 1976)、直列悉皆モデルでは説明できない結果が示されて (Sternberg, 1975を参照) おり、記憶探索過程の性質については、標的の性質や数、被験者の方略などを考慮した柔軟なモデルが必要であると考えられる。

視覚探索課題における反応時間は、刺激セットの大きさによって変動するが、そのパフォーマンスは2つ

の要因の影響を受ける。1つは、標的と妨害項目の類似性である。標的と妨害項目が似ていないほど、また妨害項目同士の類似性が高いほど、標的は容易に検出される (Duncan & Humphreys, 1989)。また、標的がただ1つの特徴で妨害項目と区別される場合 (例えば、赤い標的 vs. 緑の妨害項目) にはその検出時間は刺激セットの大きさの影響を受けないが、標的が複数の特徴の組み合わせで定義される (例えば、赤い×と緑の○の中から赤い○を探す) 場合、刺激セットの大きさとともに反応時間は延長する (Treisman & Gelade, 1980; Treisman & Gormican, 1988)。

視覚探索課題のパフォーマンスを決定するもう1つの要因は、課題におけるマッピング条件の相違である (Schneider & Shiffrin, 1977; Shiffrin & Schneider, 1977)。CM課題 (常に、妨害項目である文字の中から数字の標的を検出するような課題) では、練習を繰り返すことによって、反応時間が刺激セットの大きさに影響を受けない自動的検出段階に達することができる。それに対し、VM課題 (例えば、標的も文字も同じ文字セットから決められ、同じ文字が試行によって標的となったり、妨害項目となったりする課題) では、練習を繰り返しても、反応時間が刺激セットの大きさとともに延長する制御的探索の段階にとどまる。

行動測度を用いた研究で、記憶探索過程と視空間的探索過程についていくつかの性質の相違が指摘されている。視空間的探索過程が標的と妨害項目の区別のしやすさ (Duncan & Humphreys, 1989) や妨害項目の抑制の程度 (Flach, 1986) に影響されるのに対し、記憶探索過程は、記憶セットを構成する複数の項目が“標的”という1つのカテゴリーに統合される程度 (Flach, 1986; Schneider & Fisk, 1984) に依存する。また、負試行における反応時間の分布を調べた Hockley (1984) は、記憶探索課題では記憶セットが大きくなるにつれて反応時間分布の歪度が大きくなる、すなわち分布の右裾がのびるのに対し、視空間探索課題では、分布型そのものはあまり変化せず、刺激セットが大きくなるにつれて分布が全体的に右に移動する (反応時間が長くなる) ことを報告した。さらに、Fisk & Rogers (1991) は、記憶探索課題と視空間的探索課題とで、加齢に伴うパフォーマンスの変化を比較した。その結果、負荷の増加に伴う反応時間の延長の程度について、CM条件下での練習後の視空間的探索課題では年齢差が見られたのに対し、記憶探索課題ではそれが認められなかった。一方、VM条件では、視空間的探索課題では加齢の影響が認められなかったのに対し、記憶探索課題では年齢による違いが現れた。彼らは、これらの結果から、記憶探索と視空間探索で

は、それに関わる処理メカニズムが異なると推測している。

3. 行動測度の限界と事象関連電位(ERP)の可能性

前節でとりあげた研究では、認知過程の性質を推定するための道具として、行動測度、中でも反応時間が用いられている。ところが、反応時間は、刺激呈示時点から反応の完了に至るまでに関与する複数の処理段階における処理時間の総和(加算的という意味ではない)であり、各段階ごとの変動の程度については、何らかの前提に基づいて推論しなければならない。Sternberg(1969)の要因加算法も、そのような前提の1つであり、(1)人間の情報処理過程は、刺激入力から反応出力までの重複しない一連の段階で行われ、(2)異なる処理段階の持続時間に影響を与える複数の実験的操作は反応時間に加算的に影響し、(3)同じ処理段階に影響を与える複数の実験的操作は反応時間に交互作用的効果を生じる、と仮定する。しかし、2つの処理段階が処理容量を共有する段階にある時には、例えば2つの実験的操作が交互作用を生じたとしても、必ずしもそれらの操作が同じ処理段階に影響を及ぼしたとは結論できない(Van der Molen, Bashore, Halliday, & Callaway, 1991)など、前提の妥当性をめぐる問題は常につきまとう。

行動測度の持つこのような限界は、加齢に伴う認知機能の変化の性質に関するFisk & Rogers(1991)とCerella(1991)の論争に現れている。Fisk & Rogers(1991)は、前節で紹介した結果に基づき、年齢による行動変化を考える際に、記憶探索過程と視空間的探索過程、あるいはVM課題とCM課題では、加齢の影響に違いがあることを考慮する必要性を指摘している。これに対し、Cerella(1991)は、Fisk & Rogers(1991)やその他の視覚探索実験の結果を、記憶負荷と空間負荷を組み合わせた“比較負荷”の関数として並べ替えて検討した結果、加齢によるパフォーマンスの低下は、総ての情報処理過程に対する中枢神経系の一様な速度低下の影響の結果であると解釈している。

このような行動測度に基づく結論の相違を解決するためには、認知機能を行動測度とは異なる観点から反映しうる測度を用いることが有効であろう。その可能性をもつ従属測度として、事象関連電位(event-related potentials, ERP)がある。ERPとは、感覚・知覚・認知などの脳の情報処理に関わる神経集団の同期的活動で生じる電場電位である(Hillyard & Kutas, 1983; 沖田, 1989)。ERPは、極性、潜時、振幅、頭

皮上の分布といった特徴で記述される複数の成分で構成されている。情報処理論的アプローチをとるERP研究において、反応時間などの行動測度を併用しながら、ERPの各成分と心理学的過程との対応づけが試みられてきており(Gaillard, 1988)、現在までに、期待、選択的注意、定位反応、刺激評価、意味処理、短期記憶などの心理学的概念との対応が想定される種々のERP成分が報告されてきた(Donchin, Karis, Bashore, Coles, & Gratton, 1986; Hillyard & Picton, 1987を参照)。

認知過程の測度としてのERPの長所は、被験者の課題遂行に依存せずに記録できる点と、時間的分解能に優れる点である。前者から、被験者が無視した刺激に対する処理や、自動的な処理過程の性質についての情報を得ることが可能になる。また、刺激入力(あるいはそれ以前)から行動出力に至るまでの脳過程をミリ秒単位で連続的に記録できることから、その過程に介入する心的機能の順序や重なり、持続時間などについて、比較的直接的に推測することができる。さらに、多数の部位から記録したERP成分の頭皮上分布の分析とMRI(magnetic resonance imaging)やPET(positron emission tomography)、さらに最近開発されたfMRI(functional MRI)などを併用することによって、特定の心的機能に関連する脳部位を特定したり、情報処理の各段階の機能的関連について推測することも可能である。

4. 視覚探索に関する現在までのERP研究

視覚探索に関する初期のERP研究では、記憶負荷や空間負荷とP3b成分との関連に焦点が当てられた。一般に、記憶負荷が増加すると反応時間と同様P3b潜時が増加し(Adam & Collins, 1978; Ford, Roth, Mohs, Hopkins, & Kopell, 1979; Gomer, Spicuzza, & O'donnell, 1976; Kramer, Schneider, Fisk, & Donchin, 1986)、P3b振幅は減少する(Kramer et al., 1986; Kramer, Strayer, & Buckley, 1991; Looren de Jong, Kok, & Van Rooy, 1988)。また、さまざまな課題変数がP3bと反応時間にそれぞれ異なる効果をもたらすことが明らかになっており、系列位置、刺激の語彙性、教示の効果は反応時間のみに認められることから、記憶検索過程について、短期記憶内の項目全体に比較的浅い、自動的な処理が行われた後に、より制御的な処理が行われることが示唆されている(竹形, 1991を参照)。

空間負荷とP3bの関係に注目した研究は、記憶負

荷に関する研究に比べて数は少ない。P3b 潜時は、記憶負荷と同様に、空間負荷の増大につれ延長する (Hoffman, Simson, & Houck, 1983; Luck & Hillyard, 1990; Van Dellen, Brookhuis, Mulder, Okita, & Mulder, 1985)。P3b 振幅に及ぼす空間負荷の効果はやや複雑である。Van Dellen et al. (1985) や Miyatani & Maedo (1994) では、空間負荷の増加に伴い P3b 振幅は減少した。一方、Hoffman et al. (1983) では P3b 振幅には空間負荷による影響はなかった。Luck & Hillyard (1990) の実験においては、正試行では空間負荷効果は認められなかったが、負試行では、刺激セットが大きいほど P3b 振幅が増大した。ERP を用いる研究では、刺激強度の違いによる ERP 波形の変化をさけるために、呈示する刺激項目数は一定としながら、項目を処理すべき位置の数を変えたり、有意な刺激の代わりに無意味なパタン刺激を呈示して空間負荷を操作することが多い。これらの研究で、空間負荷が P3b 振幅に及ぼす効果が一貫していないのは、実験によって空間的注意の分布など、別の要因の影響の仕方が異なるためであると考えられる。

CM 課題の練習によって標的検出が自動的に行われるようになった段階では、P3b の潜時、振幅ともに、記憶負荷 (Kramer et al., 1986, 1991) や空間負荷 (Hoffman et al., 1983; Van Dellen et al., 1985) の影響を受けなくなる。P3b を指標とする視覚探索研究では、P3b 潜時は、反応の準備や実行とは比較的独立した刺激評価時間を反映する (Duncan-Johnson, 1981; Magliero, Bashore, Colos, & Donchin, 1984) 測度として、P3b 振幅は、知覚的処理資源の配分の程度 (Isreal, Chesney, Wickens, & Donchin, 1980) の測度として用いられる。Hoffman et al. (1983) は、VM 課題で記録した P3b 振幅と CM 課題下での P3b 振幅に違いがないことから、CM 課題においても容量に限界のある処理資源が用いられていると推測している。

P3b 成分の他に、処理陰性電位 (Näätänen, 1982) に注目した研究もある。Okita, Wijers, Mulder, & Mulder (1985) は、空間選択的注意と記憶検索を組み合わせた課題を実行中の被験者から ERP を記録した。彼らは、被験者に凝視点を中心とした仮想的な四角形の一方の対角線に注目させ、あらかじめ覚えた標的文字がその位置に呈示された場合のみ反応させた。その際、記憶セットの大きさを 1, 2, 4 と変化させ、それによる ERP の変化を調べた。注目していない場所に呈示された非標的刺激に対する ERP には記憶負荷による違いがなかったが、注目場所の非標的刺激

ERP には、刺激後 300-700 ms の区間に、Cz 優位に分布し、記憶負荷に伴って振幅が増大する明瞭な陰性電位が認められた。Okita et al. (1985) は、これを探索陰性電位 (search negativity) と呼び、短期記憶における制御的探索過程を反映する電位であると推定した。この探索陰性電位は、色による選択 (Wijers, Mulder, Okita, Mulder, & Scheffers, 1989) や文字の大きさによる選択 (Wijers, Mulder, Okita, & Mulder, 1989)、あるいは心的回転 (Wijers, Otten, Feenstra, Mulder, & Mulder, 1989) などと組み合わせた記憶探索課題でも認められている。さらに、刺激として母音や純音を用いた聴覚的課題においても、視覚課題に類似した探索陰性電位が報告されている (Okita, 1989)。

一方、空間負荷によって変動する陰性電位として NA (Ritter, Simson, & Vaughan, 1983; Ritter, Simson, Vaughan, & Macht, 1982) がある。NA とは、弁別課題実行時の ERP から単純反応実行時の ERP を引き算して得られる差波形に認められる陰性電位変動で、刺激後約 100 ms で始まり、200-300 ms で頂点に達する。NA の頂点潜時が、刺激の複雑性 (Ritter et al., 1983) やマスク刺激の有無 (Ritter et al., 1982) によって影響されるのに対し、NA 頂点から N2 頂点までの時間間隔は変化しない。一方、記憶負荷の操作によって弁別課題の困難度を変えても NA の開始潜時や頂点潜時は変化せず、N2 の開始潜時と頂点潜時が延長する (Ritter et al., 1982)。これらの結果から、N2 が刺激の分類過程を反映するのに対し、NA はその前段階である刺激のパターン認知過程を反映するとされていた。

その後、NA は単一の成分ではなく、複数の成分で構成される合成波であると考えられるようになった。Simson, Ritter, & Vaughan (1985) は、頭皮上の T5 や O1 で記録した NA 波形に 2 つのピークを認めた。2 種類の刺激が交互に出現し、次の刺激を被験者が予測できる事態でも、短潜時の陰性波は増大した。それに対し、潜時の長い陰性波では、2 種の刺激の呈示順序がランダムか、あるいはランダムであると被験者が期待している時のみ、振幅の増大が認められた。Simson et al. (1985) は、この結果から、NA の初期成分は刺激の符号化を、後期成分は刺激の同定のための記憶検索をそれぞれ反映していると考えた。また、Ritter, Simson, & Vaughan (1988) は、5 文字のアルファベットを同時に呈示し、その文字列中に母音が含まれているか否かの判断を行った場合の NA について検討した。母音が必ず中央に呈示される場合、左端か右端のどちらかに呈示される場合、5 文字のどこか

に呈示される場合の3条件のNAを比較したところ、開始潜時には違いがなかったが、処理すべき情報量、すなわち注目すべき場所の数が増加するにつれて、頂点潜時や持続時間が長くなった。また、NAの波形や頭皮上分布の時間的変化の分析から、NAには少なくとも3成分、すなわち潜時約160msに頂点をもちO1に優勢に現れる成分、190-200msで始まり約300msまで続くPz優位の成分、および潜時約320msに頂点があり、O1、T5に優勢に出現する成分、が含まれるとした。処理情報量の効果は初期成分ではなく、第3成分に顕著に現れたことから、刺激の符号化には3条件間で差がなく、記憶検索の程度がNAの第3成分に反映され、NAを延長させたと考えた。

このように、視覚探索に関する多くのERP研究で、行動測度を用いた研究で得られた知見をさらに確実にし、また補完する結果が得られてきた。ところが、従来のERP研究では、P3b潜時は記憶負荷によっても空間負荷によっても延長するが、空間負荷による影響の方が大きいことを報告したBrookhuis, Mulder, Mulder, Gloerich, Van Dellen, Van der Meere, & Ellermann (1981)などの少数の例外を除き、視覚探索にかかわる視空間的探索過程と記憶探索過程、言い換えればERPに及ぼす空間負荷の効果と記憶負荷の効果が必ずしも区別されてこなかった。例えば、Wijers, Okita, Mulder, Mulder, Lorist, Poiesz, & Scheffers (1987)は、空間負荷を操作するために、凝視点を中心とする正方形の4隅に刺激を呈示し、被験者にはどちらか一方の対角線上の2隅、または4隅全てに注目させた。その結果、空間負荷とともに振幅が増大する陰性電位を見出したが、彼らはこの電位を、記憶負荷を操作したOkita et al. (1985)と同様の探索陰性電位であると考えている。また、Ritter et al. (1988)のNAの第3成分の変動は空間負荷の操作によるものであったにもかかわらず、彼らは、NAの後半部は“記憶”探索過程を反映すると主張した。

認知過程の測度としてERPを用いる場合、その各成分と心理学的過程との対応関係を明らかにしていくことが必要である。前述のように、反応時間や正答率などの行動的測度を用いた研究で、視覚的探索には性質の異なる2種類の処理メカニズムが関与することが指摘されている。したがって、それぞれに対応するERP成分の同定や、空間負荷効果と記憶負荷効果を区別する試みが必要である。そのような成分や分析法が特定できれば、ERP測度の特長を生かした視覚探索へのアプローチが可能になる。また、ある実験操作が、行動測度に関して異なる結果をもたらすにもかかわらず、ERPに対して常に同じ効果を及ぼすとすれ

ば、何故心理生理学的反応と行動測度が一致しないのか、その心理学的意味を考察しなければならない。いずれにせよ、視覚探索に関するERP研究が有用な知見を提供するためには、視覚探索課題における空間負荷と記憶負荷がERPにどのような影響を及ぼすのかをはっきりさせておかなければならない。

宮谷 (1992) は、この点を明らかにするために、視覚探索課題における空間負荷と記憶負荷を組み合わせる操作し、各条件のERPを比較した。刺激後300-450ms区間のERP波形は、負荷の種類にかかわらず負荷が大きくなるにつれて陰性方向にシフトした。2種類の負荷効果は頭皮上分布の点で異なっており、空間負荷による陰性シフトが後頭部(O1, O2)および後部側頭部(T5, T6)に優勢に出現したのに対し、記憶負荷の効果はCzを中心に頭部全体で認められた。空間負荷効果の得られた潜時帯や頭皮上分布はRitter et al. (1988)と、記憶負荷効果の出現の様相はOkita et al. (1985)とそれぞれ一致しており、宮谷 (1992) は、探索陰性電位には、視空間的探索過程を反映するもの(以下、空間探索電位)と、記憶探索過程を反映するもの(記憶探索電位)の2種類があると結論した。

宮谷 (1992) は、2種類の探索陰性電位を区別する根拠として頭皮上分布の違いを挙げた。しかし、空間探索電位の頭皮上分布については、研究間で必ずしも一致した結果が得られていない。例えば、前述したWijers et al. (1987)では、空間探索電位は後頭部(Oz)で最大の振幅を示したものの、前頭部(Fz)、中心部(Cz)、頭頂部(Pz)にも広く分布していた。後頭部・後部側頭部優勢な空間探索電位を報告した宮谷 (1992) や Ritter et al. (1988) と、前頭部や中心部への広範な分布を認めたWijers et al. (1987)の手続きを比較すると、記憶セットの決定の仕方が異なっている。Wijers et al. (1987)では、記憶セット(アルファベットまたは数字)が実験系列ごとに変更されたのに対し、Ritter et al. (1988)では、記憶セットは、常にA, I, U, E, Oの5母音で構成された。また、宮谷 (1992)の用いた記憶セットも、大きさが1の場合にはAに、3の場合にはA, B, Cに、5の場合にはA, B, C, D, Eに固定されており、これらの文字が妨害刺激となることはなかった。宮谷・前堂・赤井 (1994)では、宮谷 (1992)の手続きを、実験系列ごとに標的を変化させるように変更した結果、後頭部・後部側頭部と同様、中心部でも探索陰性電位が空間負荷に伴って大きく増大することを見いだした。この結果は、記憶セットの決定方法によって、空間探索電位の頭皮上分布が異なることを示すものである。

第2節で述べたように、VM課題とCM課題の違い

は、練習による視覚探索の自動化の過程を決定する重要な要因であり (Schneider & Shiffrin, 1977; Shiffrin & Schneider, 1977), 探索過程を反映する ERP 成分にも影響を及ぼすであろうことは十分に予想できる。Mecklinger, Kramer, & Strayer (1992) は、記憶負荷に伴って中心部に発達する陰性電位は、作業記憶における処理容量を反映し、処理が自動的になるほど振幅は減少すると考えている。これを空間負荷効果に当てはめて考えれば、記憶セットの決定方法による頭皮上分布の違いを説明できる。宮谷・赤井 (1993) では、CM課題において空間負荷による反応時間の影響がほとんどなくなるまで練習した後では、中心部優勢な陰性電位だけでなく、後頭部・後部側頭部優位な陰性電位もほとんど認められなかった。

Miyatani (Note 1) は、空間負荷に関する同一の実験的操作が、課題によっては空間探索電位の頭皮上分布に異なる影響を及ぼすことを示した。単純な視覚探索課題と、視覚探索と色による選択を組み合わせた課題を比較すると、空間負荷による探索陰性電位の頭皮上分布は、後者の方でより中心部・前頭部寄りであり、色選択と組み合わせられた視覚探索課題で得られた空間探索電位の分布は、記憶探索電位の分布とほとんど同じであった。この結果は、同じ実験的操作であっても、課題の性質によっては異なる処理段階に影響を及ぼすことを示している。後頭部・後部側頭部優位な陰性電位は視覚情報処理系に配分された処理容量を、中心部・前頭部優勢な陰性電位が視覚情報に依存しない作業記憶での作業に配分された処理容量を反映するとすると、Miyatani (Note 1) の結果は、2つの課題では、視空間的探索が種類の異なる情報 (例えば、視覚コード vs. 音声コード) に基づいて行われたことを示唆する。また、心的回転の角度に応じて変動する頭頂部・後頭部優勢な陰性電位を報告した Wijers, Otten, Feenstra, Mulder, & Mulder (1989) の結果は、心的回転作業において、視覚情報処理系がかなり関与していることを示す結果と言えよう。

5. 視覚探索に関する今後の ERP 研究

視覚探索に関する有力な理論の1つに、特徴統合理論 (Treisman & Gelade, 1980; Treisman & Gormican, 1988) およびその修正理論がある。これらの理論では、視覚的対象の知覚は、性質の異なる2つの過程で成立すると考えられている。まず、視覚的環境に含まれる様々な特徴 (色, 明るさ, 線の向き, 両眼視差, 線分の端点・交点, 図形の閉合性, 刺激の運動など, 視覚

情報処理過程のごく初期の段階で抽出される単純な刺激特性, Enns, 1990 を参照) が、視野全体にわたって並列的かつ自動的 (前注意的) に抽出される。続いて、何らかの特徴が存在する空間内の位置へ順々に注意が向けられ、同じ位置にある複数の特徴が統合されて1つのまとまった対象が知覚される。初期の並列的特徴抽出過程については、視覚系において、これらの特徴がかなり特殊化した部位で別々に処理されていることを示す数多くの生理学的データ (例えば, Livingstone & Hubel, 1988; Van Essen & Maunsell, 1983; Zeki, 1978) によって支持されている。特徴統合過程における空間的注意の働き (Navon, 1990) や空間的注意を誘導するメカニズムの問題 (Cave & Wolfe, 1990), さらには統合された対象に関する情報の一時的表象の保存や再認ネットワークとの相互作用に関する問題 (Treisman & Gormican, 1988; Treisman & Sato, 1990) が、今後の大きな論点となると思われる。

ERP を指標とする視覚探索研究は、これらの問題解決に大いに役立つと考えられる。前節でとりあげた P3b や探索陰性電位の他に、視覚探索に関連する多くの ERP 成分が報告されている。空間内のどこかの位置に持続的に注意を向け、注意を向けた場所に出現した刺激に対する ERP 波形と注意していない位置に出現した刺激に対する ERP 波形を比較すると、前者の P1, N1 成分の振幅が増大する (Eason, 1981; Harter, Aine, Schroeder, 1982; Hillyard & Münte, 1984; Hillyard & Mangun, 1987; Mangun & Hillyard, 1988)。また、P1 と N1 は、空間選択的注意における異なる側面をそれぞれ反映することが示唆されており (Heinze, Luck, Mangun, & Hillyard, 1990; Luck, Heinze, Mangun, & Hillyard, 1990; Mangun & Hillyard, 1991), さらに、中心手がかり (Eimer, 1993) や周辺手がかり (Eimer, 1994) による空間選択的注意効果は、持続的注意事態とはやや異なった形で ERP 上に反映されることも報告されている。

後頭部や後部側頭部で記録される N1 は、空間的注意の有無だけでなく、その分布にも影響を受け、注意を向ける領域が小さいほど振幅は増大する (宮谷・前堂・赤井, 1994)。また、必ずしも効果の現れ方は一貫していないが、その振幅や潜時が刺激セットの大きさによって変化するという報告もある (Miyatani & Maedo, 1994; Wijers et al., 1987)。また、中心部で記録され、潜時300 ms前後に頂点をもつ視覚N2は、空間的注意が向けられた刺激に対して大きく出現する (Okita et al., 1985)。さらに、出現する刺激の位置や数が実験系列内で固定され、あらかじめわかっている

る場合には、それらがランダムあるいは規則的に変化する場合に比べ、探索陰性電位が出現する時間帯のERP波形がより陰性方向にシフトする (Miyatani & Maedo, 1994; Miyatani, Sakata, & Toshima, Note 2)。探索陰性電位との関連はまだ明らかでないが、我々の日常では、何かはどこかにある (あるいは出現する) ことを期待して行動する場合と、何がいつどこに現れるかわからない状況の両方があり、この現象は、そのような事態における注意の働きの違いを反映しているのかもしれない。

前節で取り上げた諸成分も含め、これら視覚探索に関連すると思われる電位変動は、今まで、相互に異なる実験パラダイムで検討されることが多かった。同じ課題において、同一の実験変数に対する諸成分の共変関係や反応の違いを比較していくことで、視覚探索において働きの機能的個々の性質や相互の関係が、さらに明らかになっていくであろう。最近では、ポップアウト現象に対応すると考えられる電位変動 (N2pb, N2pc) も報告され始めており (Luck & Hillyard, 1994)、視覚探索に関するERP研究の可能性はますます広がっているように思われる。

6. まとめ

選択的注意の性質を調べるために、視覚探索課題がよく用いられる。本稿では、行動測定やERP測定を用いたこれまでの視覚探索研究の概観を試みた。ERP測定は、人間の認知活動の、行動測定だけでは推定しにくい側面を反映しうる。このような特徴を生かして、行動測定による研究をさらに確認し、あるいは補完する多くのERPデータが提出されてきた。視覚探索に関連する多数のERP成分の相互関係を調べることによって、ERP研究は視覚探索研究に今後さらに多くの貢献をなしうるであろう。

Reference Note

1. Miyatani, M. Topographic differences of the display load effects on search-related negativity in different task requirements. *Manuscript in preparation.*
2. Miyatani, M., Sakata, S., & Toshima, T. Effects of the change of display size within versus between blocks of trials on event-related brain potentials during a visual search. *Manuscript in preparation.*

References

- Adam, N., & Collins, G. I. 1978 Late components of the visual evoked potential to search in short-term memory. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 44, 147-156.
- Brookhuis, K. A., Mulder, G., Mulder, L. J. M., Gloerich, A. B. M., Van Dellen, H. J., Van der Meere, J. J., & Ellermann, H. H. 1981 Late positive components and stimulus evaluation time. *Biological Psychology*, 13, 107-123.
- Cave, K. R., & Wolfe, J. M. 1990 Modeling the role of parallel processing in visual search. *Cognitive Psychology*, 22, 225-271.
- Cerella, J. 1991 Age effects may be global, not local: Comments on Fisk and Rogers (1991). *Journal of Experimental Psychology: General*, 120, 215-223.
- Donchin, E., Karis, D., Bashore, T. R., Coles, M. G. H., and Gratton, G. 1986 Cognitive psychophysiology and human information processing. In M. G. H. Coles, E. Donchin, & S. W. Porges (Eds.), *Psychophysiology: Systems, processes, and applications*. Amsterdam: Elsevier. Pp. 244-267.
- Duncan, J., & Humphreys, G. W. 1989 Visual search and stimulus similarity. *Psychological Review*, 96, 433-458.
- Duncan - Johnson, C. C. 1981 P300 latency: A new metric of information processing. *Psychophysiology*, 18, 207-215.
- Eason, R. G. 1981 Visual evoked potentials correlates of early neural filtering during selective attention. *Bulletin of Psychonomic Society*, 18, 203-206.
- Eimer, M. 1993 Spatial cueing, sensory gating and selective response preparation: An ERP study on visuo-spatial orienting. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 88, 408-420.
- Eimer, M. 1994 An ERP study on visual spatial priming with peripheral onsets. *Psychophysiology*, 31, 154-163.
- Enns, J. T. 1990 Three-dimensional features that pop out in visual search. In D. Brogan (Ed.), *Visual search*. London: Taylor & Francis. Pp. 139-158.

- Fisk, A. D., & Rogers, W. A. 1991 Toward an understanding of age-related memory and visual search effects. *Journal of Experimental Psychology: General*, 120, 131-149.
- Flach, J. M. 1986 Within-set discrimination in a consistent mapping search task. *Perception & Psychophysics*, 39, 397-406.
- Ford, J. M., Roth, W. T., Mohs, R. C., Hopkins, W. F. III., & Kopell, B. S. 1979 Event-related potentials recorded from young and old adults during a memory retrieval task. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 47, 450-459.
- Gomer, F. E., Spicuzza, R. J., & O'Donnell, R. D. 1976 Evoked potential correlates of visual item recognition during memory-scanning tasks. *Physiological Psychology*, 4, 62-65.
- Harter, M. R., Aine, C., & Schroeder, C. 1982 Hemispheric differences in the neural processing of stimulus location and type: Effects of attention on visual evoked potentials. *Neuropsychologia*, 20, 421-438.
- Heinze, H. J., Luck, S. J., Mangun, G. R., & Hillyard, S. A. 1990 Visual event-related potentials index focused attention within bilateral stimulus arrays. I. Evidence for early selection. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 75, 511-527.
- Hillyard, S. A., & Kutas, M. 1983 Electrophysiology of cognitive processes. *Annual Review of Psychology*, 34, 33-61.
- Hillyard, S. A., & Mangun, G. R. 1987 Sensory gating as a physiological mechanism for visual selective attention. In R. Johnson, Jr., R. Parasuraman, & J. W. Rohrbaugh (Eds.), *Current trends in event-related potential research*. Amsterdam: Elsevier, Pp. 61-67.
- Hillyard, S. A., & Münte, T. F. 1984 Selective attention to color and location: An analysis with event-related brain potentials. *Perception & Psychophysics*, 36, 185-198.
- Hillyard, S. A., & Picton, T. W. 1987 Electrophysiology of cognition. In F. Plum (Ed.), *Handbook of physiology: Sec. 1: the nervous system: Vol. 5. Higher functions of the brain*. Bethesda, ND: American Physiological Society, Pp. 519-584.
- Hockley, W. E. 1984 Analysis of response time distributions in the study of cognitive processes. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 10, 598-615.
- Hoffman, J. E. 1979 A two-stage model of visual search. *Perception & Psychophysics*, 25, 319-327.
- Hoffman, J. E., Simons, R. F., & Houck, M. R. 1983 Event-related potentials during controlled and automatic target detection. *Psychophysiology*, 20, 625-632.
- Isreal, J. B., Chesney, G. L., Wickens, C. D., & Donchin, E. 1980 P300 and tracking difficulty: Evidence for multiple resources in dual-task performance. *Psychophysiology*, 17, 259-273.
- Johnston, W. A., & Dark, V. J. 1986 Selective attention. *Annual Review of Psychology*, 37, 43-75.
- Kramer, A., Schneider, W., Fisk, A., & Donchin, E. 1986 The effects of practice and task structure on components of the event-related brain potential. *Psychophysiology*, 23, 33-47.
- Kramer, A., Strayer, D. L., & Buckley, J. 1991 Task versus component consistency in the development of automatic processing: A psychophysiological assessment. *Psychophysiology*, 28, 425-437.
- Livingstone, M., & Hubel, D. 1988 Segregation of forms, color, movement and depth: Anatomy, physiology and perception. *Science*, 240, 740-749.
- Luck, S. J., Heinze, H. J., Mangun, G. R., & Hillyard, S. A. 1990 Visual event-related potentials index focused attention within bilateral stimulus arrays. II. Functional dissociation of P1 and N1 components. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 75, 528-542.
- Luck, S. J., & Hillyard, S. A. 1990 Electrophysiological evidence for parallel and serial processing during visual search. *Perception & Psychophysics*, 48, 603-617.
- Luck, S. J., & Hillyard, S. A. 1994 Electrophysiological correlates of feature analysis during visual search. *Psychophysiology*, 31, 291-308.
- Magliero, A., Bashore, T. R., Coles, M. G. H.,

- & Donchin, E. 1984 On the dependence of P300 latency on stimulus evaluation processes. *Psychophysiology*, 21, 171-186.
- Mangun, G. R., & Hillyard, S. A. 1988 Spatial gradients of visual attention: Behavioral and electrophysiological evidence. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 71, 417-428.
- Mangun, G. R., & Hillyard, S. A. 1991 Modulations of sensory-evoked brain potentials indicate changes in perceptual processing during visual-spatial priming. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 17, 1057-1074.
- Mecklinger, A., Kramer, A. F., & Strayer, D. L. 1992 Event related potentials and EEG components in a semantic memory search task. *Psychophysiology*, 29, 104-119.
- 宮谷真人 1992 視覚的探索課題で出現する2種類の探索陰性電位について. 生理心理学と精神生理学, 10, 23-33.
- 宮谷真人・赤井俊幸 1993 マッピング条件が異なる視覚的探索課題における事象関連電位 広島大学教育学部紀要第一部 (心理学), 42, 1-10.
- Miyatani, M., & Maedo, S. 1994 Event-related potentials during a visual search task: Effects of the arrangement and the number of display items. *Hiroshima Forum for Psychology*, In press.
- 宮谷真人・前堂志乃・赤井俊幸 1994 視覚探索課題における空間負荷と記憶負荷が事象関連電位に及ぼす影響. 心理学研究, 65, 303-311.
- Moray, N. 1969 *Attention: Selective processes in vision and hearing*. New York: Academic Press.
- Näätänen, R. 1982 Processing negativity: An evoked potential reflection of selective attention. *Psychological Bulletin*, 92, 605-640.
- Navon, D. 1990 Does attention serve to integrate feature? *Psychological Review*, 97, 453-459.
- Neisser, U. 1967 *Cognitive psychology*. New York: Appleton-century-Crofts.
- 沖田庸嵩 1989 事象関連電位と認知情報処理—選択的注意を中心として— 心理学研究, 60, 320-335.
- Okita, T., Wijers, A. A., Mulder, G., & Mulder, L. J. M. 1985 Memory search and visual spatial attention: An event-related potential analysis. *Acta Psychologica*, 60, 263-292.
- Ritter, W., Simson, R., Vaughan, H. G., Jr., & Macht, M. 1982 Manipulation of event-related potential manifestations of information processing stages. *Science*, 218, 909-910.
- Ritter, W., Simson, R., & Vaughan, H. G., Jr. 1983 Event related potential correlates of two stages on information processing in physical and semantic discrimination tasks. *Psychophysiology*, 20, 168-179.
- Ritter, W., Simson, R., & Vaughan, H. G., Jr. 1988 Effects of the amount of stimulus information processed on negative event-related potentials. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 69, 244-258.
- Schneider, W., & Fisk, A. D. 1984 Automatic category search and its transfer. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 10, 1-15.
- Schneider, W., & Shiffrin, R. M. 1977 Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention. *Psychological Review*, 84, 1-66.
- Shiffrin, R. M. 1988 Attention. In R. C. Atkinson, R. J. Herrnstein, G. Lindzey, & R. D. Luce (Eds.), *Stevens' handbook of experimental psychology 2nd ed.* New York: Wiley. Pp. 739-781.
- Schiffrin, R. M., & Schneider, W. 1977 Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending, and a general theory. *Psychological Review*, 84, 127-190.
- Simson, R., Ritter, W., & Vaughan, H. G., Jr. 1985 Effects of expectation on negative potentials during visual processing. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 62, 25-31.
- Sternberg, S. 1966 High-speed scanning in human memory. *Science*, 153, 652-654.
- Sternberg, S. 1969 The discovery of processing stages: Extensions of Donders' method. In W. G. Koster (Ed.), *Attention and performance II.* (*Acta Psychologica*, 30). Amsterdam: North-Holland. Pp. 173-188.
- Sternberg, S. 1975 Memory scanning: New findings and current controversies. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 27, 1-32.
- 竹形理佳 1991 事象関連電位と短期記憶検索過程 心

- 理学評論, 34, 345—357.
- Theios, J. Smith, P. G., Haviland, S. E., Traupman, J., & Moy, M. C. 1973 Memory scanning as a serial self-terminating process. *Journal of Experimental Psychology*, 97, 323—336.
- Townsend, J. T. 1976 Serial and within-stage independent parallel model equivalence on the minimum completion time. *Journal of Mathematical Psychology*, 14, 219—238.
- Treisman, A. M., & Gelade, G. 1980 A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, 24, 479—486.
- Treisman, A., & Gormican, S. 1988 Feature analysis in early vision: Evidence from search asymmetry. *Psychological Review*, 95, 15—48.
- Treisman, A., & Sato, S. 1990 Conjunction search revisited. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 459—478.
- Van Dellen, H. J., Brookhuis, K. A., Mulder, G., Okita, T., & Mulder, L. J. M. 1985 Evoked potential correlates of practice in a visual search task. In D. Papakostopoulos, S. Butler, & I. Martin (Eds.), *Clinical and experimental neuropsychophysiology*. Beckenham: Croom Helm. Pp. 132—155.
- Van der Molen, M. W., Bashore, T. R., Halliday, R., & Callaway, E. 1991 Chronopsychophysiology: Mental chronometry augmented by psychophysiological time markers. In J. R. Jennings, & M. G. H. Coles (Eds.), *Handbook of cognitive psychophysiology: Central and autonomic nervous system approaches*. Chichester: John Wiley & Sons. Pp. 9—178.
- Van Essen, D. C. & Mausell, J. H. R. 1983 Hierarchical organization and functional streams in the visual cortex. *Trends in Neuroscience*, 6, 370—375.
- Wijers, A. A., Mulder, G., Okita, T., & Mulder, L. J. M. 1989 Event-related potentials during memory search and selective attention to letter size and conjunctions of letter size and color. *Psychophysiology*, 26, 529—547.
- Wijers, A. A., Mulder, G., Okita, T., Mulder, L. J. M., & Scheffers, M. K. 1989 Attention to color: An analysis of selection, controlled search, and motor activation, using event-related potentials. *Psychophysiology*, 26, 89—109.
- Wijers, A. A., Okita, T., Mulder, G., Mulder, L. J. M., Lorist, M. M., Poiesz, R., & Scheffers, M. K. 1987 Visual search and spatial attention: ERPs in focussed and divided attention conditions. *Biological Psychology*, 25, 33—60.
- Wijers, A. A., Otten, L. J., Feenstra, S., Mulder, G., & Mulder, L. J. M. 1989 Brain potentials during selective attention, memory search, and mental rotation. *Psychophysiology*, 26, 452—467.
- Zeki, S. M. 1978 Functional specialization in the visual cortex of the rhesus monkey. *Nature*, 274, 423—428.